

東丹沢大洞沢試験流域における窒素流出機構

小田智基*・鈴木雅一*・内山佳美**

Mechanisms of nitrogen export in Ohborasawa Watershed in Tanzawa Mountains

Tomoki ODA*, Masakazu SUZUKI* and Yoshimi UCHIYAMA**

要 旨

丹沢山地大洞沢における窒素流出について把握するため、降水・土壌水・地下水・溪流水の水質モニタリングを行い、水の流動過程とともにどのように硝酸態窒素濃度が形成されているのかを調べ、さらに窒素収支の推定を行なった。降水中 NO_3^- 、 NH_4^+ 濃度はおよそ $10 \mu\text{mol/l}$ であり、樹冠を通過すると $20 \mu\text{mol/l}$ 近くにまで濃度が上昇した。さらに、土壌の浅い部分での NO_3^- 濃度は高い濃度 ($100 \mu\text{mol/l}$) であるが、深く浸透するにつれて濃度が低下し、溪流水への流出 NO_3^- 濃度は $30 \sim 40 \mu\text{mol/l}$ であった。 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N を合わせた林外雨と樹冠を通過した林内雨・樹幹流による N 流入負荷量は、2010～2011 年の平均でそれぞれ 7 kgN/ha ・ 13 kgN/ha であった。それに対して大洞沢内の 3 流域 (No 1、No 3、No 4 流域) の N 流出負荷量はそれぞれ 14、9、 26 kgN/ha であった。大洞沢流域末端における N 流出負荷量は 10 kgN/ha を超える高い流出量であり、窒素飽和に近い状態にある可能性が示唆された。

I はじめに

窒素は樹木の成長に不可欠な栄養分であり、森林生態系では樹木の成長の制限要因になっていると言われている (Vitousek and Howarth, 1991)。しかし、近年、都市近郊における森林では大気降下物量が増加し、窒素降下物による窒素供給が増加しているという報告があり、その影響が森林生態系や河川の水質に及ぶことが懸念されている。長期的に高濃度の窒素降下物にさらされると、森林から高濃度の NO_3^- が溪流に流出する窒素飽和と言われる現象 (Aber *et al.*, 1998) が起こると言われており、日本でも関東地方の森林で溪流への高濃度の NO_3^- 流出が報告されている (Ohnishi *et al.*, 1997; 戸田ら, 2002)。

神奈川県丹沢山地でも、同様に都市域からの距離が近く、大気降下物が多い地域と考えられるため、このような窒素飽和現象が起こり、将来的に河川の水質環境に影響を及ぼす可能性がある。そのため、長期的なモニタリングを行い、生態系内の窒素収支や水質について知見を得る必要がある。これまで、戸田ら (2007) などが同地域でモニタリングを行い、大洞沢流域における窒素降下物量は全国的に見て比較的多いということを報告している。また、丹沢における河川水中の NO_3^- 濃度も比較的高く、都市域からの大気汚染物質が森林生態系に影響を与えている可能性が指摘されている。しかし、これらの降下物が森林内でどのように生態系に取り込まれ、流出しているかは複雑であり、詳細には明らかになって

* 東京大学大学院 農学生命科学研究科 (〒113-8657 東京都文京区弥生 1-1-1)

** 神奈川県自然環境保全センター 研究企画部 研究連携課 (〒243-0121 厚木市七沢 657)

いない。

本研究では、降水物によって供給された窒素が樹冠を通過し、土壤に浸透し、流出するまでの過程でどのように濃度変化をし、どの程度が流出しているのかを把握するために東丹沢大洞沢流域において、降水・土壌水・地下水・渓流水について集中的に観測した。さらに、降水量、流出量の観測も同時に行い、流域の窒素収支についても把握することを目的とした。

II 方 法

1 流域概要

調査地である大洞沢流域は、神奈川県の大洞沢山地の東部、中津川上流（宮ヶ瀬ダム上流）の標高 432～878m に位置する（北緯：35° 28' N, 東経：139° 12' E）48ha の流域であり（図 1）、調査対象流域は 48ha の流域に加え、その内の 5 ha（No 4 流域）、7 ha（No 3 流域）の小流域の 3 流域である。小流域内はスギやヒノキの若齢林から壮年林、広葉樹林等の多様な林分がモザイク状に配置している。地質は

新第三紀層丹沢層群大山垂層群に属する。流域は地形が比較的急峻であり、複雑な深い谷を形成している。流域の平均傾斜はおよそ 36° である。降水量はおよそ 3000mm/year である（内山ら, 2009）。

2 観測方法

林外雨は No5 地点において、10 l のポリボトルに直径 21cm のロートを付けたサンプラーを用いて採水した。林内雨は、スギ、ヒノキの樹冠下（T 1, T 2）に、林外雨採取用と同様のサンプラーを 5 個ずつ設置し、定期的に採水した。樹幹流は各プロット内 5 本の樹木の樹幹部にビニールチューブを巻きつけ、貯留タンクに導水し、採水した。

渓流水は大洞沢流域内の 3 流域 No 1（48ha）、No 3（7 ha）、No 4（5 ha）において、それぞれの流域末端に設置された量水堰（Weir 1、Weir 3、Weir 4）にて観測毎に採水した。林外雨・林内雨・樹幹流・渓流水の採水は、2009 年 6 月 10 日から 2012 年 2 月 14 日まで 2 週間から 1 ヶ月に 1 回の程度の頻度で定期的に行なった。

さらに、図 1 の S 地点に土壌水採取プロットを 3

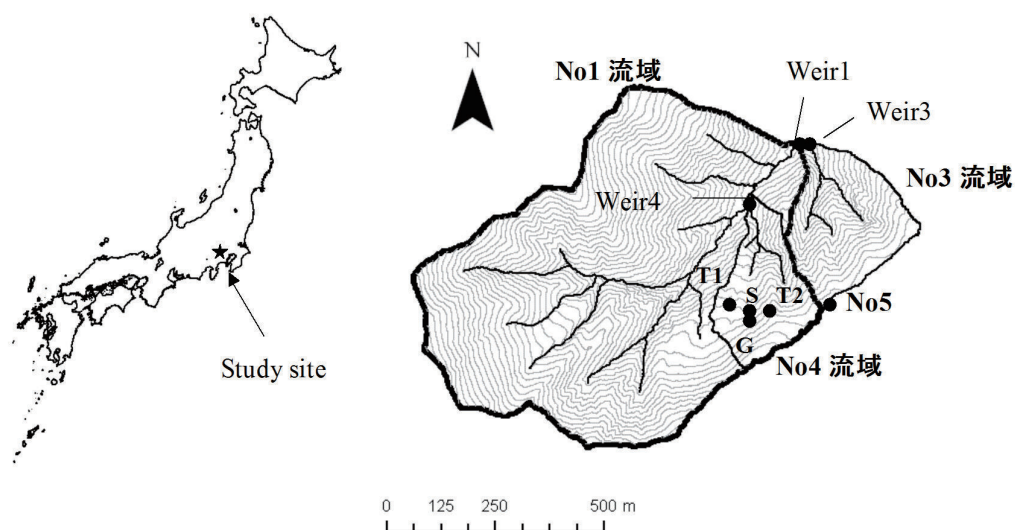


図 1 大洞沢流域の地形図

Weir 1, 3, 4 : 量水堰、T 1, T 2 : 林内雨・樹幹流観測点
S : 土壌水観測点、G : 地下水観測点、No 5 : 降水量観測点

点設置し、それぞれ 10cm, 30cm, 70cm の深度にテンションライシメータを設置した。土壌水は観測時にハンドポンプを用いて、ポーラスカップにつないだ三角フラスコ内を減圧しフラスコ内にたまっている水を回収した。また、G 地点において地下水採取用の井戸（深度 1 m, 直径 6 cm）を 2 点設置した（G 1、G 2）。その中に 50ml のポリボトルを取り付けた直径 1 cm 程度の塩ビパイプを挿入して飽和地下水を採水した。土壌水、地下水の採水は 2011 年 4 月 17 日から 2012 年 2 月 14 日まで 2 週間から 1 ヶ月に一度の頻度で行った。

採取してきたサンプルは東京大学に持ち帰り、 $0.2 \mu\text{m}$ のメンブレンフィルターを用いてろ過した後、バイアルに入れ、冷蔵庫で保存した。分析はイオンクロマトグラフィーにより行い、 NO_3^- ・ NH_4^+ の濃度を測定した。

物質流入量の算出方法は、観測毎の林外雨量、林内雨量、樹幹流量にそれぞれの物質の平均濃度を掛け合わせたものを算出した。流域内の植生分布は、1997 年の大洞沢における植生調査により、スギ・ヒノキ混交林が流域の 60% 以上を占めているという報告がされていることから、スギ・ヒノキが代表的な植生であると考えてスギ・ヒノキ樹冠下の林内雨濃度の平均を流域の林内雨濃度として計算した。物質流出量は、観測期間中の単純平均濃度と期間中の

総流量を掛け合わせるにより算出した。

III 結果・考察

1 流域内の濃度変動

林外雨・林内雨・土壌水・地下水・渓流水中の NO_3^- 、 NH_4^+ 濃度分布を図 2 に示す。 NO_3^- 濃度は、林外雨の 2010 年から 2011 年の平均濃度が $9 \mu\text{mol/l}$ に対し、林内雨濃度平均は $12 \mu\text{mol/l}$ 、樹幹流は $19 \mu\text{mol/l}$ であった。 NH_4^+ は、林外雨の平均濃度が $8 \mu\text{mol/l}$ に対し、林内雨濃度平均は $11 \mu\text{mol/l}$ 、樹幹流は $12 \mu\text{mol/l}$ であった。林外雨から、林内雨・樹幹流への濃度上昇が認められ、樹冠に付着した乾性沈着成分によるもの、また葉からの溶脱によると考えられる。

土壌水中には NH_4^+ はほとんど含まれなかった。 NO_3^- 濃度は地表面からの深度が 10cm から 70cm までの土壌で $100 \mu\text{mol/l}$ 以上に大きく濃度上昇し、地下水では $10 \sim 50 \mu\text{mol/l}$ に濃度が低下している。この濃度変化は、土壌中では硝化によって大量に生成された NO_3^- が、水の地下水への浸透過程で樹木や微生物によって吸収されたためであると考えられる。また、土壌水は観測毎のばらつきが大きく、この原因は降水の混合によると考えられる。それに対し、地下水の G 1、G 2 では NO_3^- 濃度はそれぞれ

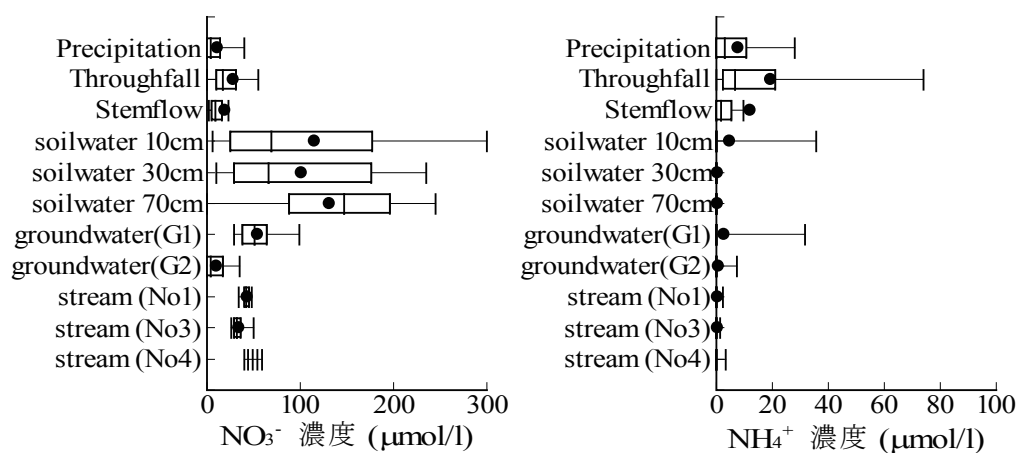


図2 林外雨・林内雨・土壌水・地下水・渓流水の NO_3^- 、 NH_4^+ 濃度分布

表1 2010年、2011年の $\text{NO}_3^- \cdot \text{NH}_4^+$ 流入量・流出量

	流入		流出		
	林外雨	林内雨+樹幹流	No1	No3	No4
NO_3^- (kgN/ha)					
2010	5.2	8.0	13.0	9.0	25.3
2011	1.2	4.5	14.7	8.6	26.7
NH_4^+ (kgN/ha)					
2010	5.9	5.4	0.1	0.1	0.4
2011	0.7	2.2	0.0	0.0	0.3

平均 $10 \mu\text{mol/l}$, $54 \mu\text{mol/l}$ と空間的なばらつきはあるものの、比較的安定しており変動は小さかった。渓流水中の平均 NO_3^- 濃度は、No 1, No 3, No 4 流域でそれぞれ $43 \mu\text{mol/l}$, $33 \mu\text{mol/l}$, $49 \mu\text{mol/l}$ であり、渓流水質は、地下水 G 1 の濃度が渓流水中の濃度と同程度であり、平水時には地下水起源の NO_3^- が水とともに溪流に流出していると考えられる。

渓流水中・土壌水・地下水中の NO_3^- 濃度の季節変化を図3に示す。渓流水への NO_3^- 流出は明確な季節変動は見られず、一年を通して $30 \sim 40 \mu\text{mol/l}$ の濃度で安定していた。土壌水・地下水においても明確な季節変動は見られなかった。地下水では、G 1 で高濃度の NO_3^- が一回検出されたが、それ

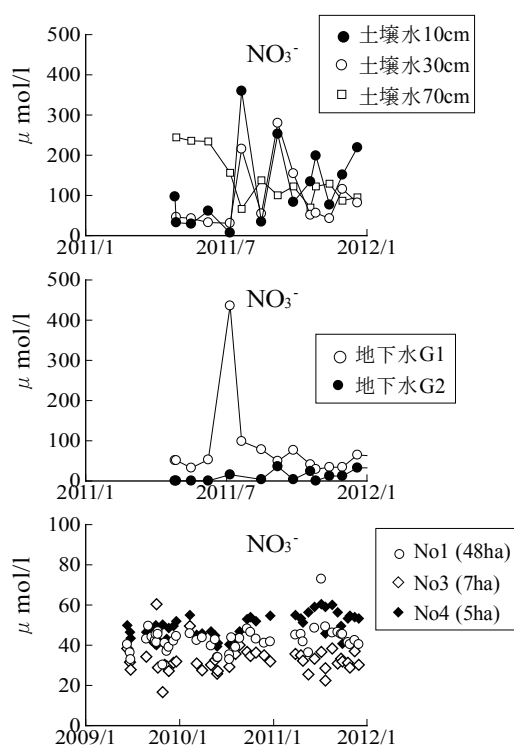
以外は安定しており、1年を通じて同様の値であった。

2 物質収支

2010年、2011年の NO_3^- 、 NH_4^+ の流入量・流出量を表1に示す。大洞沢では、 NO_3^- -N と NH_4^+ -N を合わせたN流入量は、林外雨による湿性沈着成分が2010年では 11 kgN/ha に対して2011年では 2 kgN/ha であった。さらに樹冠を通過した林内雨・樹幹流による流入量は2010年は 13 kgN/ha 、2011年は 7 kgN/ha とわずかに林外雨に比べて流入量が増加している。林内雨では降雨中の湿性沈着に加え、乾性沈着量が多いことが分かった。

窒素流出は、 NH_4^+ の形態ではほとんど流出せず、 NO_3^- の形態で流出していた。2010年のNo 1、No 3、No 4のN流出量はそれぞれ 13 , 9 , 25 kg-N/ha であり2011年は 15 , 9 , 27 kg-N/ha であった。No 3流域は深部地下水浸透によって流域外に流出する量が大きく、No4流域は逆に地下部を通じて隣接する流域から流入していることが分かっており (Oda *et al.*, 2012)、流域間の流出負荷量の違いは、流出水量の違いによるところが大きいと考えられる。No 1流域は岩盤を通じての損失水量や流入水量が小さいことから、この流域の代表的なN流出量を示していると考えられ、およそ 14 kgN/ha の流出量であった。

N流入量が、 10 kgN/ha/yr を超えると、窒素飽和が起こる可能性があると言われており (Mitchell *et al.*, 1997; Wright *et al.*, 1995)、2010年に 13 kgN/ha 程度の流入量が観測された大洞沢は、窒素沈着量の多い地域であると考えられる。しかし、2011年のN流入量は 7 kgN/ha と前年と比べ大きく減少した。2年間のデータでは、減少傾向にあるのか、もともと年毎にばらつきが大きいのかは判断で

図3 渓流水・土壌水・地下水の NO_3^- 濃度季節変動

きないが、年々で大きな変動があることが明らかになった。それに対し、N 流出量は、大洞沢を代表する No1 流域で両年とも 10 kgN/ha を超えており、高窒素流出状態が継続している。

N 流入量は年々で大きく変動しているが、N 流出量は大きな変動がなく安定しており、大気由来の N 流入によらず生態系内の N 循環は安定しており、流域内に蓄積された N が流出していると考えられる。N 流出は、長期的な N 流入の履歴により形成されると推測される。そのため、今後も流入 N 量、流出 N 量の計測により、長期的な傾向を把握する必要がある。それに加え、流域内の水質形成機構の調査を継続し、流出する窒素濃度が高い原因を究明することが必要である。

IV まとめ

東丹沢大洞沢流域において、降水・土壌水・地下水・渓流水における窒素濃度と収支を計測した。その結果、土壌水で NO_3^- 濃度が急上昇し、地下水で濃度低下が見られ、渓流水に流出していた。水の浸透過程における NO_3^- 濃度形成が明らかになった。さらに、物質収支から、7～13 kgN/ha、平均 10 kgN/ha の年々変動の大きな流入量に対し、流出量は 13～15 kg/ha、平均 14 kg/ha と安定していた。このことから短期的な N 流入量の変動ではなく、長期的な履歴が高 N 流出を形成していると考えられる。大洞沢では、他の流域に比べ比較的大きな N 流入量・流出量が見られ、今後もモニタリングを継続し、長期的な生態系・環境への影響を把握する必要がある。

V 参考文献

- Aber, J., W. McDowell, K. Nadelhoffer, A. Magill, G. Berntson, M. Kamakea, S. McNulty, W. Currie, L. Rustad, and I. Fernandez (1998) Nitrogen saturation in temperate forest ecosystems, *BioScience*, 48, 921-934.
- Mitchell, M. J., Iwatsubo, G., Ohrui, K., Nakagawa, Y. (1997) Nitrogen saturation in Japanese forests: an evaluation. *Forest Ecology and Management*. 97: 39-51.
- Oda, T., Suzuki, M., Egusa, T., Uchiyama, Y., (2012) Effect of bedrock flow on catchment rainfall runoff characteristics and the water balance in forested catchment in Tanzawa Mountains, Japan. *Hydrological Processes*, DOI:10. 1002/hyp.9497
- Ohrui, K and M J, Mitchell, (1997) Nitrogen saturation in Japanese forested watersheds. *Ecological Application*, 7: 391-401.
- Ohte, N., M. J. Mitchell., Shibata, H., Tokuchi, N., Toda, H., Iwatsubo, G., (2001) Comparative evaluation on nitrogen saturation of forest catchments in Japan and Northeastern United States. *Water Air and Soil Pollution*, 130: 649-654.
- 戸田浩人 (2002) 陸上生態系の物質循環からみた窒素飽和による汚染の構図. *資源環境対策*, 38: 1067-1072.
- 戸田浩人. 白木克繁・石川芳治・内山佳美・鈴木雅一 (2007) 大洞沢の降雨水質. *丹沢大山総合調査学術報告書*.
- 内山佳美・相原敬次・飯田勝彦・板寺一洋 (2009) : $\delta^{18}\text{O}$ をトレーサーとした短期流出特性把握におけるサンプリング方法の検討. *神奈川県自然環境保全センター報告 第 6 号*, 63-68
- Vitousek P. M., Howarth R. W. (1991). Nitrogen limitation on land and in the sea: How can it occur? *Biogeochemistry*, 13, 87-115.
- Wright, R. F., Roelofs, J. G. M., Bredemeir, M., Blanck, K., Boxman, A. W., Emmet, B. A., Gunderson, P., Hultberg, H., Kjonaas, O. J., Moldan, F., Tietema, A., van Breemen, N., van Dijk, H. F. G. (1995) NITREX: responses of coniferous forest ecosystems to experimentally changed deposition of nitrogen. *Forest Ecology and Management*. 71: 163-169.

